تاثیر آلومینیوم موجود بر نمودارهای فازی تعادلی Fe-C-Al-Si*

(یادداشت پژوهشی)

علیرضا کیانی رشید[۱]

چکیده

MTDATA، بسته نرم افزاری قدرتمندی برای محاسبهٔ شرایط تعادلی و دیاگرام‌های فازی است. این نرم افزار برای بررسی استحاله‌های فازی یا شبیه سازی فرآیندها قابل استفاده است که بستگی به نوع پایگاه داده‌هایی دارد که در اتصال با آن‌ها می باشد. در این تحقیق نمودارهای فازی سیستم آهن- کربن- آلومینیوم- سیلیسیم (Fe-C-Al-Si) با به کار بردن نرم افزار MTDATA و استفاده از پایگاه داده‌های SGTE محاسبه گردیدند تا فازهای موجود در دماهای متفاوت و محدوده ترکیب شیمیایی مورد نظر و در شرایط تعادلی تعیین شوند. مشاهده گردید که افزایش آلومینیوم باعث تغییرات تعادلی آهن – کربن در این ترکیبات آلیاژی می شود. ناحیه آستنیت با افزایش آلومینیوم کوچک تر شده و برای چدن‌های حاوی حدود ٤/٨٨٪ Al یا بیش تر هیچ نشانی از یک ناحیه آستنیتی دیده نمی‌شود. نتایج تجربی حاصل از عملیات حرارتی و دیلاتومتری در تلفیق با مشاهدات انجام گرفته با میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی گواه توافق خوب نمودارهای فازی محاسبه شده برای مقادیر کم و مقدار بالای ٦/١٦٪ Al می‌باشد. به هرحال محاسبات انجام شده برای ٤/٨٨٪ Al با مشاهدات اختلاف نشان می‌دهد و آزمایش‌ها با آلیاژ حاوی این مقدار آلومینیوم بیانگر این نکته است که استحاله‌های آستنیتی در این آلیاژ اتفاق می افتد، درحالی که شاهدی بر حضور ناحیه γ در نمودار فازی محاسبه شده وجود ندارد.

واژه‌های کلیدی شبیه سازی، آلومینیوم، نمودارهای فازی، آستنیت (γ)، نرم افزار MTDATA .

The influence of Al content on the Fe-C-Al-Si equilibrium phase diagrams

A.R. Kiani-Rashid

Abstract

MTDATA is a powerful software package for equilibrium conditions and phase diagram calculations. It can be applied in phase transformation or process simulations depending on the kind of databases they are connected to. The iron-carbon-aluminium-silicon (Fe-C-Al-Si) phase diagrams were calculated using MTDATA software and SGTE databases to determine the phases that are present at various temperature and composition ranges in equilibrium conditions. It was observed that the iron-carbon equilibrium could be modified by addition of aluminum. The austenite region decreased with increasing Al content, and in the case of cast irons containing about 4.88%Al or more, the austenite zone was disappeared. Further results obtained from heat treatment cycles and dilatometry examinations together with optical and electron microscopic investigations showed a good agreement with the calculated phase diagrams for low as well as high (6.16%)Al addition. However, there was a difference between the observations made for 4.88%Al. Experiments conducted on an alloy containing this Al content showed that the austenitic reaction occurred in the alloy, whereas no evidence was found for the γ-region in the corresponding phase diagram.

Key Words Simulation, Aluminium, Phase Diagrams, Austenite (γ), MTDATA Software

---

* نسخه نخست مقاله در تاریخ ٨٦/٨/٢٣ و نسخه پایانی آن در تاریخ ٨٧/٥/٢٠ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

نمودارهـای فـازی تعـادلی در مباحـث متـالورژیکی از اهمیت زیادی برخوردارنـد. بـه کمـک ایـن نمودارهـا امکان بررسی ریزساختار آلیاژها، ترکیب شیمیایی آن‌ها و همچنین، تعیین نوع و درصد فازها فراهم مـی‌شـود. در این راستا محققان روش‌های بسیار متنوعی را بـرای رسم آن‌ها ارائه کرده اند که بسیاری از این روش‌ها نیاز به تهیه نمونه‌های بسیار و انجام آزمایش‌های پـر دامنـه دارند. در همـین راسـتا همـواره تمایـل فراوانـی بـرای بهره‌گیری از رایانه و سیستم شبیه سازی وجود داشته و تعداد قابل توجهی از این نرم افزارها طراحی و استفاده شده‌اند. نمونه‌هایی از بسته‌های نرم افـزاری کـه اخیـراً مورد استفاده قرار گرفته‌انـد، MTDATA و Thermo-Calc می‌باشند [1,3].

توانمندی این نرم افزارها بستگی به پایگـاه‌هـای اطلاعاتی عظیمـی دارد کـه توسـط گـروه‌هـای علمـی سازمان یافته ای همچون SGTE حمایت شده و امکـان کنتـرل و اسـتاندارد کـردن آنهـا را فـراهم مـی‌سـازند. مفروضـات و داده‌هـای مـورد اسـتفاده در نـرم افـزار MTDATA به طور کاملاً کنترل شده‌ای توسـط گـروه علمی اروپایی ترمودتا گردآوری و ارزیابی شـده اسـت که با توسعه علوم و دریافت اطلاعات جدید، این نـرم افزار به طور پیوسته در حال به هنگـام شـدن و بهبـود می‌باشد [4,7].

در سیـستم نـرم افـزاری MTDATA امکانـات فراوانی در زمینه‌های متـالورژی، شـیمی، علـم مـواد و علوم دیگر، با توجه بـه داده‌هـای در دسـترس، وجـود دارد. با توجه به تنوع زیاد عناصر و امکـان آلیاژسـازی بی‌شمار این عناصر امکان جمع آوری اطلاعـات موثـق برای کلیه این مواد مشکل و گاهی غیر ممکن بـه نظـر می‌رسـد. بـا توجـه بـه اینکـه کـاربران ایـن برنامـه‌هـا علاقه‌مند به تهیه نمودارهای فـازی و یـا مـدل سـازی جدیدی بر اساس آلیاژهای مورد نظر مـی باشـند، ایـن برنامه‌ها به گونه‌ای طراحی و نوشته شده‌اند کـه امکـان ورود اطلاعات مورد نظر را با توجه به تنوع در ترکیب شیمیایی، خواص و هم چنین شرایط خارجی حـاکم از نظر سایر پارامترهای ترمودینامیکی فـراهم مـی‌سـازند. ضمناً مشکلات مرتبط با عوامل اختلاط از قبیل تعـادل مابین آلیاژهای مذاب و جامد و فازهایی همچون مات، سرباره و گاز به کمک مدل‌هـای ترمودینـامیکی مـورد نیاز قابل حل بوده و دامنه وسیعی از خواص این فازها در نرم افزار و ساختارهای پایگاه داده‌هـا منظـور شـده است [6,10].

از قابلیت‌های بسیار خـوب چـدن‌هـای حـاوی آلومینیوم در مقایسه با چدن‌های معمولی، مقاومت بـالا در برابر اکسیداسیون در دماهای بالا، استحکام بالاتر در دمای اتاق و دماهـای بـالا، وزن مخـصوص کـم تـر و قابلیت ماشین کاری بهتر، می‌باشد [11,16].

بـــسته نـــرم افـــزاری MTDATA در ســـطح گسترده‌ای برای محاسبه و رسم دیاگرام‌های فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در مقایسه با سایر نرم افزارها از توانمندی‌های خوبی برخوردار است. در این تحقیـق از MTDATA برای رسم نمودارهای تعادلی فازی Fe-C-Al-Si بهره گرفته شد تا قابلیت‌هـای آن در ارتبـاط بـا این گروه خاص از این دسته آلیاژهای چـدنی بررسـی شود. در همین ارتباط ضمن توجه به محـدودیت‌هـای ناشی از کمبود اطلاعات پایگاه داده‌ها، با تغییـر درصـد آلومینیوم از ۰/۰۱ درصـد تـا ٦/١٦ درصـد بـه بهتـرین محدودهٔ تطابق نمودارهای محاسـباتی و نتـایج تجربـی اشاره شده است.

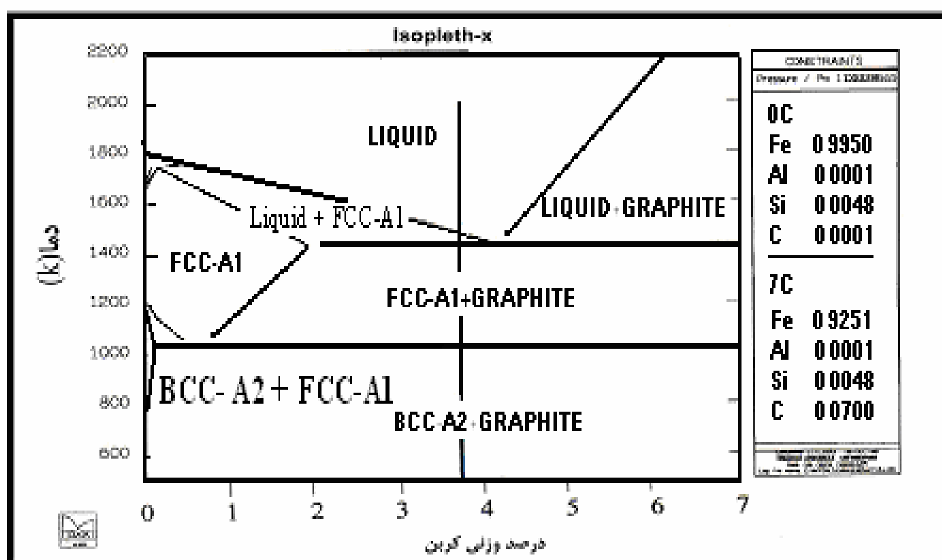
مواد و روش تحقیق

در این پژوهش بازه‌ای از دما و ترکیب شـیمیایی بـرای هر یک از آلیاژهای مورد نظر انتخـاب شـد. بـا انجـام محاسبات مربوط بـه حـداقل انـرژی گیـبس، فازهـای پایدار تعیین و به صورت مقاطع ایزوپلس رسم گردیـد (شکل‌های ۱ تا ٦). برای اطمینان بیش تر اطلاعات بـه دست آمده از محاسبات با نتایج تجربی مقایسه گردیـد

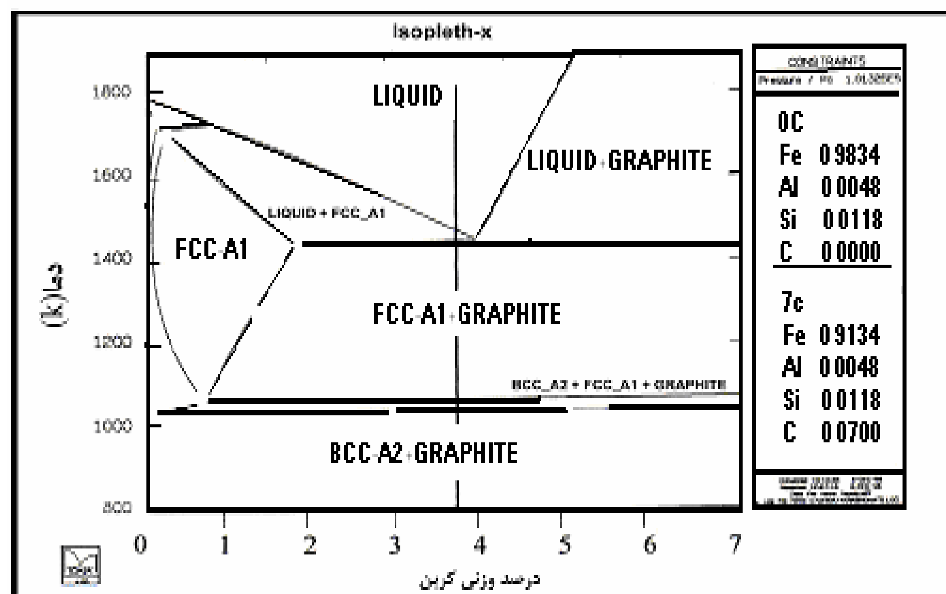
که در بسیاری از موارد از تطابق بسیار خوبی برخوردار بودند و از این رو، قابل استناد می‌باشند.

در این تحقیق شمار قابل ملاحظه ای ذوب در کوره‌های بوته‌ای و القایی تهیه و ریخته گری شد که تعدادی از آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. کوره بوته‌ای از تولیدات مورگان بوده و با سوخت گازی طراحی شده است. ظرفیت این کوره ۲۵ کیلوگرم است که با خارج کردن بوته امکان مذاب ریزی فراهم می‌شود. کوره القایی از نوع فرکانس بالا و با قابلیت کج شوندگی جهت خروج مذاب از بوته مربوطه است. ظرفیت این کوره ۲۰ کیلوگرم می‌باشد. بعد از ذوب، مذاب چدن تا دمای ۱۵۵۰°C فوق گداز شد. در این مرحله از ذوب، قطعات کوچک آلومینیومی با روش غوطه وری به عمق مذاب افزوده شد تا از شناوری آن‌ها در حین ذوب و همچنین اکسید شدن درصد بالایی از آن‌ها جلوگیری شود. در همین ارتباط زمان کافی به آلومینیوم داده شد تا به طور کامل در مذاب حل گردد. برای کروی کردن از فرو- سیلیکو- منیزیم حاوی ۵ درصد منیزیم و برای جوانه زایی از فروسیلیسیم حاوی ۷۵ درصد سیلیسیم بهره گرفته شد.

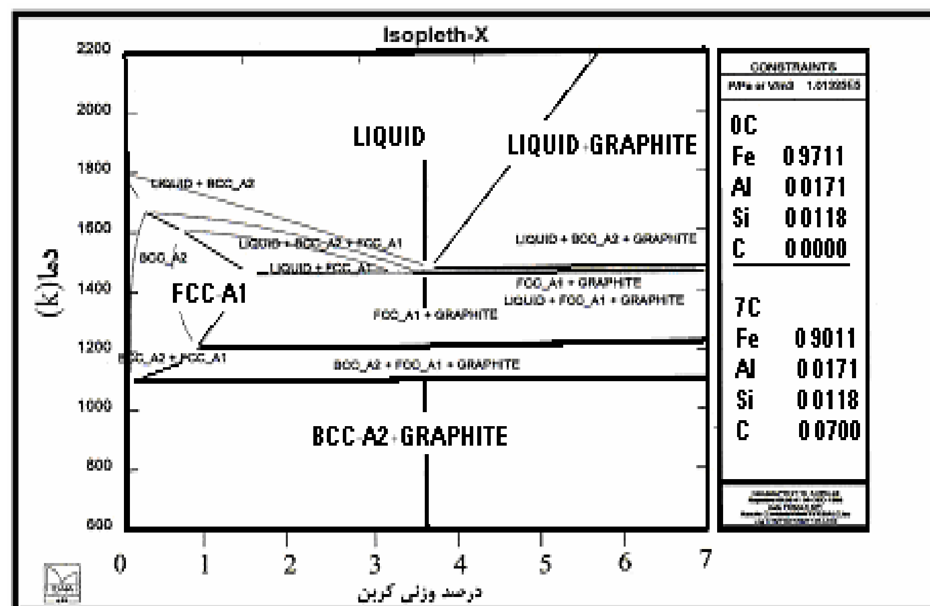
پس از آلیاژسازی، مطابق با استاندارد ASTM A536 -۸۰ بلوک‌هایی از آلیاژهای مورد نظر در قالب‌های ماسه سیلیسی ریخته گری گردید. دمای تقریبی مذاب ریزی ۱۳۵۰°C بود. وجود محفظه واکنش در سیستم راهگاهی به خاطر افزایش راندمان کروی‌سازی توسط مواد تلقیح کننده است. ترکیب شیمیایی به روش کوانتومتری تعیین گردید. برای اندازه‌گیری مقادیر دقیق تر کربن و آلومینیوم از روش‌های مجزایی بهره گرفته شد. این آزمایش‌ها در بریتیش استیل (شفیلد) و مرکز فن‌آوری تحقیق بالای دانشگاه بیرمنگام انگلیس (HIST) انجام شد.



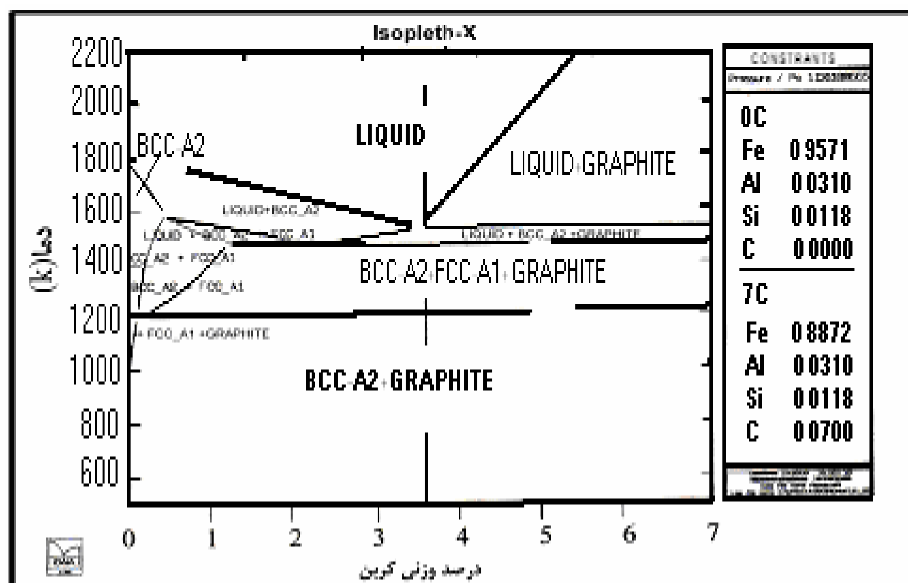
شکل ۱ نمودار فازی سیستم (Fe-C-Al-Si) برای آلیاژهای حاوی Al ۰/۰۱٪، رسم شده با نرم افزار MTDATA



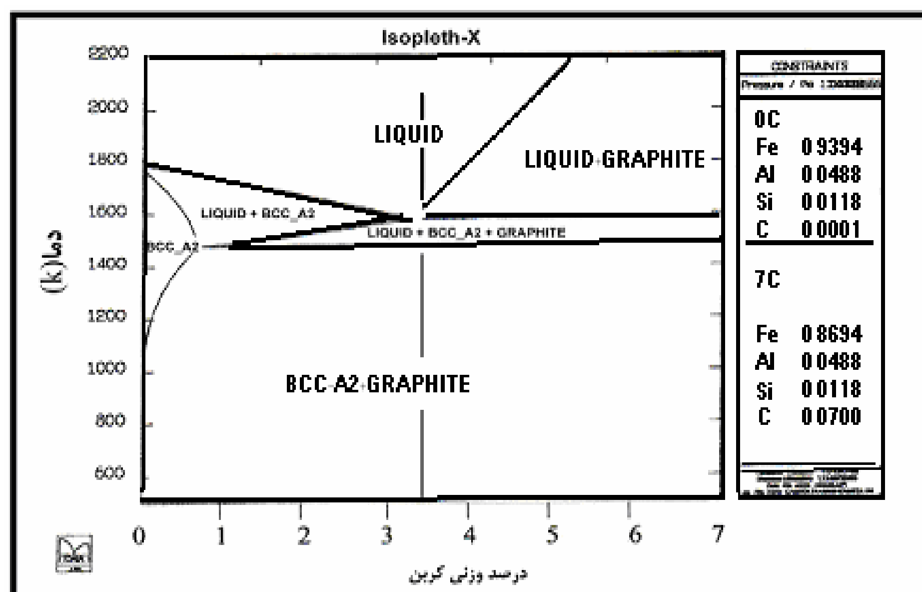
شکل ۲ نمودار فازی سیستم (Fe-C-Al-Si) برای آلیاژهای حاوی Al ۰/۴۸٪، رسم شده با نرم افزار MTDATA



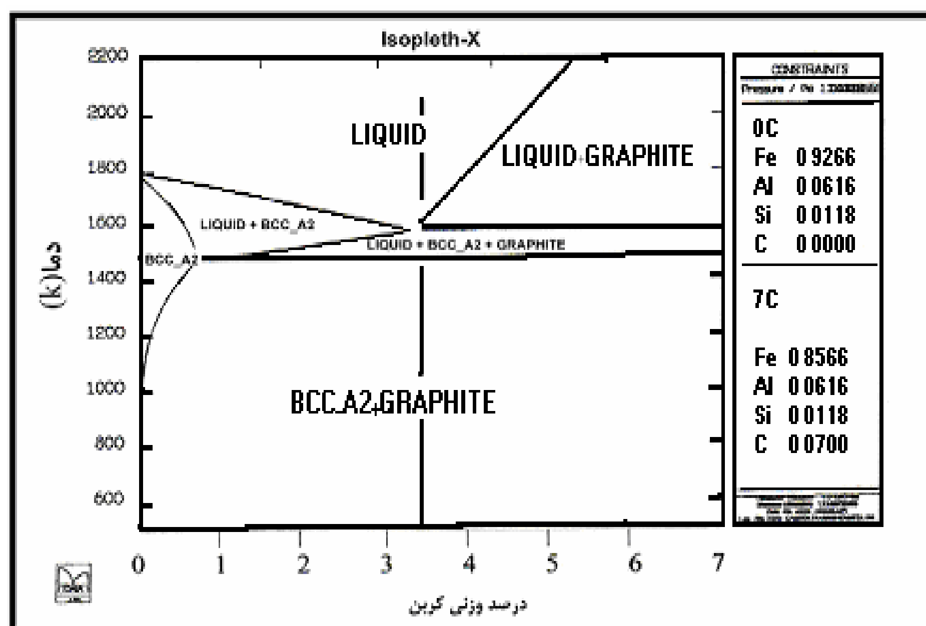
شکل ۳ نمودار فازی سیستم (Fe-C-Al-Si) برای آلیاژهای حاوی Al ۱/۷۱٪، رسم شده با نرم افزار MTDATA



شکل ٤ نمودار فازی سیستم (Fe-C-Al-Si) برای آلیاژهای حاوی Al ۳/۱۰٪،
رسم شده با نرم افزار MTDATA



شکل ٥ نمودار فازی سیستم (Fe-C-Al-Si) برای آلیاژهای حاوی Al ٤/۸۸٪،
رسم شده با نرم افزار MTDATA



شکل ٦ نمودار فازی سیستم (Fe-C-Al-Si) برای آلیاژهای حاوی Al ٦/١٦٪،
رسم شده با نرم افزار MTDATA

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژها، درصد وزنی (wt%)

Fe	Mg	S	P	Mn	Ni	Si	C	Al	آلیاژ
باقی مانده	۰/۰۵	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۰/۰۹	۰/۰۳	۱/۰۸	۳/۷۱	۰/۰۱	٪۰/۰۱Al
باقی مانده	۰/۰۵	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۰/۰۶	۰/۰٤	۱/۰۶	۳/۶۸	۰/٤۸	٪۰/٤۸Al
باقی مانده	۰/۰۵	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۰/۰۷	۰/۰٤	۱/۱۸	۳/۵۸	۱/۷۱	٪۱/۷۱Al
باقی مانده	۰/۰۶	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۰/۱۰	۰/۰۵	۱/۲٤	۳/٤۸	۳/۱۰	٪۳/۱۰Al
باقی مانده	۰/۰۵	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۰/۱۰	۰/۰۵	۱/۲۲	۳/٤٤	٤/۸۸	٪٤/۸۸Al
باقی مانده	۰/۰۶	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۰/۱۰	۰/۰۷	۱/۲۵	۳/۲۵	٦/۱٦	٪٦/۱٦Al

عملیات آستنیته کردن در دماها و زمان‌های نگه داری متفاوتی صورت گرفت و قبل و بعد از عملیات حرارتی آزمایش‌های متالوگرافی، سختی سنجی و دیلاتومتری انجام شد. برای تکمیل آزمایشات از دستگاه دیلاتومتری Diatronic III با سرعت بالا و در شرایط خلأ و خنک کردن سریع با گاز خنثی بهره گرفته شد. سرد کردن تا دمای مورد نظر توسط جریان گاز هلیم با فشار زیاد با سرعت سرد کردن ۲۵°C/sec بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی با طول ۱۰ mm، با قطر۳ mm و حفره داخلی ۱/۵mm که سرد کردن سریع را امکان پذیر می‌سازد، انجام گرفت. درهمین ارتباط چرخه‌های عملیات حرارتی متنوعی طراحی و اعمال گردید تا دگرگونی‌های فازی در آلیاژها تعیین شود [15].

تعیین ریزساختار توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی (SEM) انجام شد.

میکروسکوپ‌های نوری از نوع Nikon و Reichert-Jung بوده و برای میکروسکوپی الکترونی روبشی از یک میکروسکوپ Cambridge Series 3 SEM در اتصال با سیستم EDX و یک میکروسکوپ Cambridge Series 4 SEM استفاده شد. برای تحلیل ریزساختار فاصله ۲۴-۲۰ میلی متر اختیار گردید. ولتاژ شتاب دهنده ۲۰kV بود.

یافته‌ها

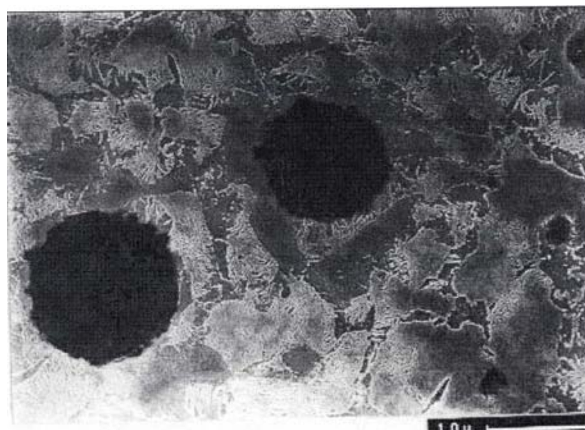
حضور عناصری همانند سیلیسیم و آلومینیوم در آلیاژهای چدنی موجب گرافیت‌زایی می‌شود. نمایش اثر این عناصر در دیاگرام آهن و کربن به وسیله مقاطعی از سیستم آلیاژی Fe-C-Si-Al و به کمک بسته‌های نرم افزاری شبیه ساز مربوطه قابل نمایش هستند. تأثیر افزایش آلومینیوم موجود روی نمودار جزئی Fe-C-Al-Si در شکل های (۱ تا ٦) نشان داده شده است. در هر نمودار Al و Si ثابت فرض شده و کربن موجود از صفر تا ۷ درصد تغییر کرده است. دیاگرام‌های فازی برای ۰/۰۱Al٪، ۰/٤۸Al٪، ۱/۷۱Al٪، ۳/۱۰Al٪، ٤/۸۸Al٪ و ٦/۱٦Al٪ ترسیم شده‌اند. میزان سیلیسیم در تمامی حالات ۱/۱۸٪ می‌باشد. این دیاگرام‌ها مشابه نمودار فازی آهن-کربن بوده و فازهای فریت، آستنیت، گرافیت و مذاب در سیستم حضور دارند. مرزهای فازی بیان گر محلی می‌باشد که دو فاز در تعادل با یکدیگر هستند.

همچنین در ارتباط با مقایسه نتایج محاسباتی با موارد تجربی، آلیاژهایی از جنس چدن و با ترکیب شیمیایی تقریباً مشابه تهیه و مجموعه ای از بررسی‌های ریز ساختاری، سختی سنجی و دیلاتومتری روی آنها انجام گرفت [15].

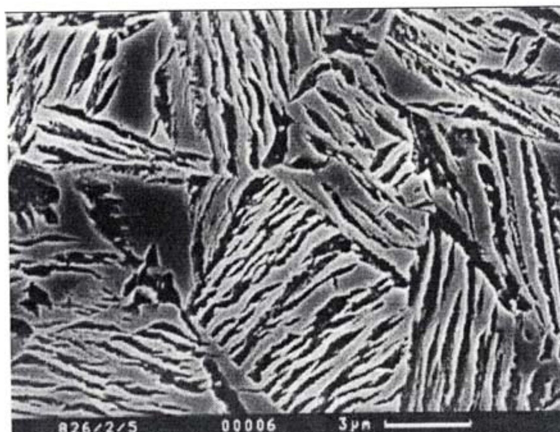
ریزساختار چدن حاوی ۰/٤۸Al٪ درحالت ریختگی متشکل از گرافیت‌های کروی در زمینه‌ای فریتی – پرلیتی می‌باشد. این نوع از چدن به مدت ۹۰ دقیقه در دمای ۹۲۰ºC آستنیته شده و سپس در آب کوئنچ شده است. این نوع عملیات حرارتی نشان‌دهنده تغییر جدی در ریزساختار است. زمینهٔ چدن به طور کامل مارتنزیتی شده و گواه خوبی بر وجود ناحیه آستنیتی در نموار فازی تعادلی آن است که با نمودارهای محاسباتی تطابق خوبی را نشان می‌دهد [15,17].

شکل (۷) نشان دهنده ریزساختار چدن حاوی ٤/۸۸Al٪ درحالت ریختگی است. در این ساختار گرافیت‌های کروی در زمینه‌ای فریتی – پرلیتی مشاهده می شوند. نمونه‌های متعددی از این آلیاژها انتخاب و عملیات حرارتی متنوعی بر روی آن‌ها انجام گردید. در همین ارتباط ریزساختار چدن حاوی ٤/۸۸Al٪ که در دمای ۹۲۰ºC به مدت ۹۰ دقیقه آستنیته شده و سپس در ۳۵۰ºC به مدت ۱۰۰ دقیقه آستمپر گردیده و نهایتاً تا دمای اطاق سرد شده‌اند، در شکل(۸) نمایش داده شده است. ساختار نهایی متشکل از فازهای گرافیت کروی، فریت بینیتی و آستنیت باقیمانده می‌باشد. زمینه بینیتی نشان دهنده پاسخ مناسب نمونه‌های چدنی به این گونه عملیات حرارتی است.

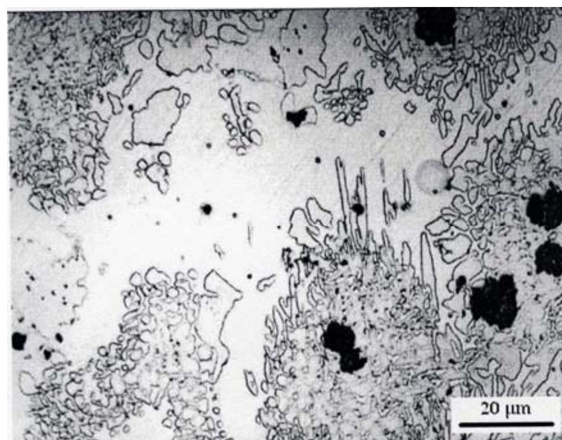
نمونه دیگری از این خانواده آلیاژی چدن‌های نشکن حاوی ٦/۱٦Al٪ می‌باشد. در ریزساختار این نوع از چدن گرافیت‌های کروی در زمینه ای از فازهای با درصد بالایی از آلومینیوم مشاهده می‌شود. با انجام عملیات حرارتی بعدی که در شرایطی مشابه با آلیاژ حاوی ۰/٤۸Al٪ انجام شده است، تغییر محسوسی در ریزساختار ایجاد نشده و این نوع آلیاژ به چنین فرآیندهایی پاسخ نمی‌دهد، (شکل ۹). دلیل این موضوع عدم وجود ناحیه آستنیت در دیاگرام فازی تعادلی است که نمودارهای محاسباتی نیز چنین پدیده‌ای را پیش بینی می‌کنند، (شکل ٦).



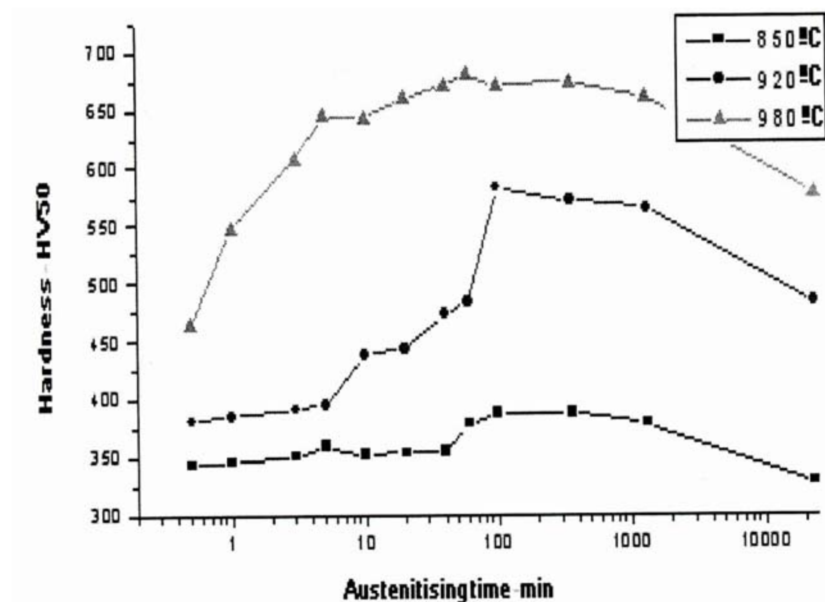
شکل ۷ ریزساختار SEM چدن نشکن حاوی Al ٤/٨٨ ٪ در حالت ریختگی.
ریزساختار شامل کره های گرافیت در زمینه‌ای فریتی- پرلیتی می باشد (محلول اچ: نایتال ۲٪)



شکل ۸ ریزساختارSEM چدن حاوی ٤/٨٨Al٪ که در دمای ۹۲۰ ºC به مدت ۹۰ دقیقه آستنیته و سپس در ۳۵۰ ºC به مدت ۱۰۰ دقیقه آستمپر گردیده است. زمینه متشکل از لایه های فریت بینیتی و آستنیت باقیمانده پر کربن می باشد (محلول اچ: نایتال ۲٪)



شکل ۹ ریزساختارLM چدن حاوی ٦/١٦Al٪ که در دمای ۹۲۰ ºC به مدت ۹۰ دقیقه آستنیته و سپس در آب کوئنچ گردیده است. تغییر محسوسی به واسطه عملیات حرارتی در مقایسه با نمونه ریختگی مشاهده نمی‌شود (محلول اچ: نایتال ۲٪).

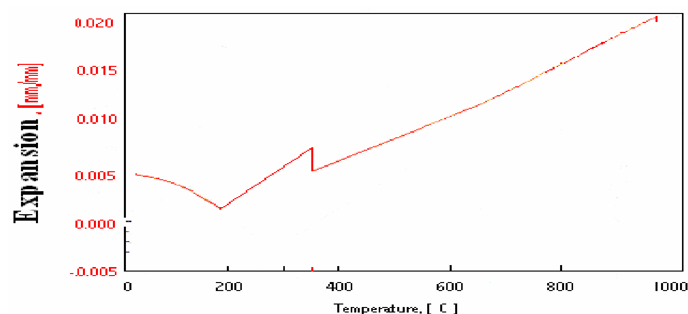


شکل ۱۰ تغییرات سختی بر حسب زمان آستنیته کردن آلیاژ حاوی ٤/٨٨Al٪
برای دماهای متفاوت آستنیته کردن.

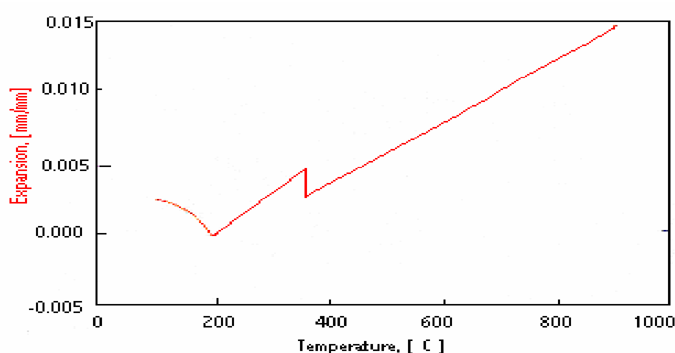
در پایان به عنوان نمونه تغییرات سختی آلیاژ حاوی ٤/٨٨Al٪ که در دماها و زمان‌های مختلف آستنیته شده، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. منحنی تغییرات ابعاد به دست آمده به روش دیلاتومتری آلیاژ ٤/٨٨Al٪ در مقایسه با تعداد دیگری از این خانواده آلیاژی در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. هم چنین در مقاله ای دیگر استفاده از عملیات حرارتی آستنیته کردن که نشان دهنده افزایش قابل ملاحظه یکنواختی و کاهش جدایش میکروسکوپی عناصر مهم موجود در آلیاژها همانند آلومینیوم و سیلیسیوم می‌باشد، گزارش شده است [17].

بحث

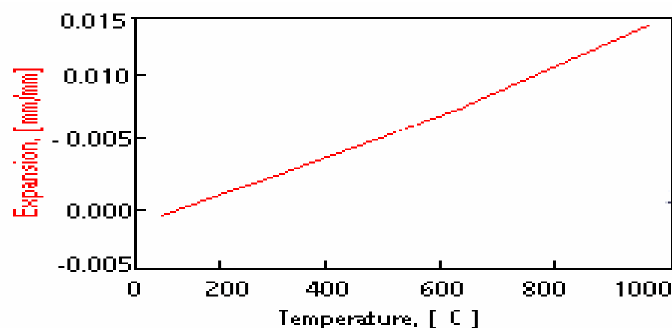
با توجه به شکل‌های (۱ تا ٦) ملاحظه می گردد که حضور عنصر آلومینیوم می‌تواند باعث بروز تغییراتی در دامنهٔ پایداری فازهای موجود در دیاگرام تعادلی گردد. ازجمله نواحی بسیار مهم در این دیاگرام که از اهمیت زیادی به ویژه در فرآیند عملیات حرارتی آلیاژهای آهنی برخوردار است، ناحیه آستنیت (γ) می‌باشد. این شکل‌ها بیانگر این واقعیت می باشند که افزایش آلومینیوم می تواند وسعت ناحیه یاد شده را کاهش دهد که در نتیجه فرآیندهای عملیات حرارتی و ریز ساختار نهایی آلیاژ را به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرند. نمودارهای رسم شده توسط نرم افزارهای مربوطه نشان می دهند که در آلیاژهای با ترکیب Al ٤/٨٨٪ یا بیشتر، ناحیه آستنیت کاملاً از بین رفته درصورتی که مطالعات ریزساختاری، سختی سنجی و دیلاتومتری نشان دهنده تغییرات جدی در ساختار این آلیاژها بعد از فرآیند عملیات حرارتی مربوطه می باشد (شکل‌های ۷ و ۸). از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که به کار گرفتن چنین نرم افزارهایی با وجود همهٔ قابلیت‌هایی که دارند، نیازمند توجه بیشتری بوده و باید با مشابه‌سازی شرایط عملی، چگونگی کاربرد آن‌ها در شرایط غیر تعادلی مشخص گردد [15].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۱ منحنی های تغییرات انبساط بر حسب درجه حرارت از فرآیند عملیات حرارتی (دیلاتومتری) استفاده شده برای چدن های نشکن حاوی آلومینیوم، آستنیته شده در $920^{o}C$ به مدت ۱۰ دقیقه و آستمپر شده در $350^{o}C$ بعد از ۱۰۰ دقیقه که سپس تا دمای محیط سرد شده است. الف) Al ۰/۴۸٪، ب) Al۴/۸۸٪ و ج) Al ۶/۱۶٪

در ارتباط با آلیاژهای با درصدهای بالاتری از Al، نمودارهای محاسباتی و آزمایش‌های انجام شده توافق بسیار خوبی را نشان می‌دهند. آستنیته کردن این آلیاژها حتی در زمان‌های بسیار طولانی و در دماهای بسیار متفاوت امکان پذیر نیست که می‌تواند بیانگر عدم وجود ناحیه γ در این گونه نمودارهای فازی باشد. تغییر موقعیت خطوط حد فاصل مابین نواحی مختلف فازی با افزایش درصد آلومینیوم می تواند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. حضور عنصری همانند Al باعث تغییرات محسوسی در پتانسیل شیمیایی عناصر و

قابلیت نفوذ آن‌ها گردیده و بـا تغییـر حـد حلالیـت و شـرایط تعـادلی، پایـداری فازهـا را تحـت تـأثیر قـرار می‌دهد. سـاختار نهـایی هـر قطعـه ریختگـی متـأثر از حضور کلیه عناصر موجود در آن آلیـاژ مـی باشـد. در همین ارتباط توجه به ریز ساختار آلیاژهای تهیـه شـده در تبیین اثر آلومینیوم می تواند بسیار مفید باشد. شـکل (۷) نمـایش دهنـده ریـز سـاختار آلیـاژ Al ٤/٨٨٪ در حالت ریختگی است که متشکل از گرافیت‌های کـروی در زمینـه فریتـی – پرلیتـی اسـت. بـا انجـام عملیـات حرارتی آستنیته کردن و آستمپر کردن در ساختار زمینه تغییر جدی ایجاد شده و پس از چنین فرآیندی، زمینـه متشکل از فریت بینیتـی و آسـتنیت باقیمانـده پرکـربن می‌باشد، (شـکل ۷). سـاختار کـاملاً بینیتـی در فرآینـد عملیات حرارتی آستنیته کـردن و آسـتمپرکردن بیـانگر وجود ناحیه γ در دیاگرام‌های فازی است ولی متأسفانه بسته‌های نرم افزاری طراحی شـده در نمـایش صـحیح این نواحی محدودیت دارنـد. از دیگـر نـواقص آن‌هـا کمبود اطلاعات مربوط به پایگاه داده‌هاست. بـه عنـوان مثال در چنین نرم افزارهایی کمبود سیستم فازی Al-C و آلیاژهای دوتایی مربـوط کـاملاً مـشهود اسـت و در نتیجه الزام به انتخاب گزینه‌های دیگر در ارتباط با رسم سیستم Fe-C-Si-Al چنین انحرافی را باعث می‌شود.

وجود تغییرات سختی برحـسب زمـان آسـتنیته کردن در آلیاژهای مختلف نیز مؤید این مطلب است که استحاله زمینه فریتی ـ پرلیتی این نوع چدن در محدوده دمایی در نظر گرفته شده ممکن بوده و افزایش سـختی در زمان‌های طـولانی‌تـر بـه معنـی درصـد بـالاتر فـاز مارتنزیت، پس از کوئنچ کردن نمونه‌ها تا دمـای اطـاق می‌باشد. کاهش مختصر سختی در زمان‌های طولانی‌تـر ناشی از رشد دانه‌های آستنیت مـی‌باشـد، (شـکل ۱۰). افزون بر ایـن، منحنـی‌هـای رسـم شـده توسـط روش دیلاتومتری و به ویژه برای آلیاژ حاوی Al ٤/٨٨٪ نیـز نشان دهنده انحراف از خط مستقیم در دمـای اسـتحاله آستنیت به سایر فازها در مرحله کاهش دما مـی باشـد.

(شکل ۱۱– ب) گواه خوبی بر وجود ناحیه آستنیت در چنین آلیاژی است.

نتیجه گیری

۱ – نمودارهای تعادلی سیستم Fe-C-Al-Si رسم شـده در این تحقیق نشان می دهند که افـزایش درصـد آلومینیـوم باعـث تحـولاتی در محـدوده و دامنـه فازهای متفاوت موجود می‌گردد.

۲ – بـا افـزایش درصـد آلومینیـوم از ۰/۰۱ تـا ٦/١٦ درصد، ناحیه آستنیت در نمودارهای تعادلی فازی کاهشی تدریجی نـشان داده و در مقـادیر حـدود Al ٤/٨٨٪ و بالاتر این ناحیه به طور کامل حذف گردیده است.

۳ – نتایج حاصل از مشاهدات میکروسـکوپی، سـختی سـنجی و دیلاتـومتری تأییـدی بـر صـحت ایـن نمودارها درآلیاژهای حاوی مقـادیر کـم و بـالای آلومینیوم است ولی در مقادیر متوسـط آلومینیـوم اختلاف محسوسی مشاهده می‌شود که می توانـد ناشی از شرایط غیر تعادلی انجماد، بررسی مقاطع ایزوپلس بدون در نظر گـرفتن ترکیـب شـیمیایی واقعی، چگونگی استحاله و یـا، فقـدان بعـضی از اطلاعات در نرم‌افزارهای موجود برای ترسیم این گونه نمودارها باشد. در همین ارتبـاط بـه منظـور انطباق بهتر نتایج با اطلاعات موجـود، توجـه بـه نحوهٔ رسم نمودارها الزامی است.

قدردانی

انجـام ایـن پـژوهش بـا حمایـت مـالی وزارت علـوم، تحقیقـات و فـن آوری میـسر گردیـد. از دکتـر انـدی واتسون، عضو هیات علمی دانشگاه لیدز انگلستان و از مـسئولان SGTE، بـه خـاطر کمـک‌هـای ارزشـمند در ترسیم نمودارهای فازی و از دکتر فاتح فاضـلی، عـضو هیأت علمی دانشگاه فردوسی مـشهد بـه خـاطر ارائـه نظرهای اصلاحی تشکر می‌گردد.

مراجع

1. Kotzin E., ″Metal Casters Reference and Guide″, USA, AFS, Aug. (1972).

2. Angus H.T., ″Cast iron, Physical and Engineering Properties″, London, Butterworths & Co (Publishers) Ltd., (1978).

3. Elliott R., ″Cast Iron Technology″, London, Butterworths & Co. (Publishers) Ltd., (1988).

4. Dinsdale A.T., ″CALPHAD, SGTE Data for Pure Elements″, 15, 4, pp. 317-425 (1991).

5. Eriksson G., and Hack K., ″ChemSage – A Computer Program for the Calculation of Complex Chemical Equiliria″, Metallurgical Trans. B, V.21B, pp. 1013-1023 (1990).

6. National Physical Laboratory (NPL), Teddington, Middlesex, UK, TW11 OLW, Reproduced by permission of the controller of HMSO, (1999).

http://www.npl.co.uk/npl/cmmt/mtdata/mtdata.htm

7. Sundman B.O., ″Thermo-Cal System, Software Description Form″, Department of material science and engineering, Stockholm, Sweden, Jan (1996).

8. Kandiner H.J., and Brinkley S.R., ″Calculation of Complex Equilibrium Problem, Ind. Eng. Chem.″, Vol.2 , No.5, pp. 850-855 (1950).

9. Gleb-Belov V., ″Thermodynamic Modeling and Thermodynamic Computer Science″, Glushko Thermocenter, IHED IVTAN Association of Russian Academy of Sciences (2003).

10. Hack K., ″Thermodynamics at work″, Institute of Metals, London (1996).

11. Pearce J.G., and Bromage K., ″Copper in Cast Iron″, London, Hutchinson & Co. (Publishers) Ltd. (1965).

12. Walson R.P., ″Aluminium Alloyed Cast Iron Properties Used in Design″, AFS, Transactions 85, pp.51-58 (1997).

13. Stefanescu D.M., and Martinez F., ″Compacted/Vermicular Graphite Cast Irons in the Fe-C-Al System″, AFS. Transactions, 39, pp. 39-46 (1982).

14. Smickley R.J., and Rundman K.B., ″The Effect of Aluminium on the Structure and Properties of Grey Cast Iron″, AFS Transactions 89, pp. 205-214 (1981).

15. Kiani-Rashid A.R., ″The Influence of Aluminium and Heat Treatment Conditions on Austempered Ductile Irons″, Ph.D., Thesis, University of Leeds, U.K. (2000).

16. Kiani-Rashid A.R., and Edmonds D.V., "Oxidation Behaviour of Al-Alloyed Ductile Irons at Elevated Temperature", ECASIA,03, Estrel Convention Center, Berlin Germany, pp. 319, 5-10 October (2003).

۱۷. علیرضا کیانی رشید و محمدعلی گلعذار، ″الگوی جدایش میکروسکوپی آلومینیوم و سیلیسیم در ریزساختار زمینه چدن‌ها با گرافیت کروی″، استقلال، نشریه مهندسی دانشگاه صنعتی اصفهان، سال ۲۲، شماره ۲، ص ۱۷۷– ۱۸۸ ، اسفند (۱۳۸۲).